

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství

Strukturně fázová analýza duplexní oceli X2CrNiMoN22-5-3

Structural phase analysis of X2CrNiMoN22-5-3 duplex stainless steel

Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Kolomazník**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R030 Technické materiály
Téma: **Strukturně fázová analýza duplexní oceli X2CrNiMoN22-5-3**
Structural phase analysis of X2CrNiMoN22-5-3 duplex stainless steel

Zásady pro vypracování:

1. Rozdělení duplexních ocelí, vliv legujících prvků.
2. Metalurgie duplexních ocelí
3. Tváření a tepelné zpracování duplexních ocelí
4. Aplikace duplexních ocelí
5. Strukturní a fázová analýza duplexní oceli X2CrNiMoN22-5-3
6. Diskuze dosažených výsledků, závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] ČÍHAL, V. Korozivzdorné oceli a slitiny. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
- [2] BALCAR, M. et al. Vývoj technologie výroby a tepelného zpracování výkovků z duplexní oceli. In: OCELÁŘI 2012, Rožnov pod Radhoštěm (Česká republika): Tanger s. r. o., 2012, s. 53-62. ISBN 978-80-87294-28-4.
- [3] SHARGAY, C. Application of Duplex Stainless Steels in Refining: Overview of API 938C [on-line]. 2005, pp. 19-27, [cit. 2014-03-05]. Dostupné z <http://www.stainless-steel-world.net/duplex/index.aspx>.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Jonšta, Ph.D.**

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 21.05.2015


prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;

Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;

Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje - horní, dolní - 2,5 cm, levý - 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra.....

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

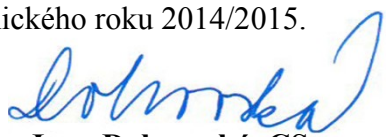
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 20. 5. 2015

Dubek Koloman Duřák

podpis (jméno a příjmení studenta)

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na korozivzdornou austeniticko-feritickou duplexní ocel X2CrNiMoN22-5-3. Teoretická část se zaměřuje na rozdělení duplexních oceli, jejich výrobu a následné zpracování. V praktické části jsou porovnávány změny ve struktuře u vzorku z duplexní oceli v základním „dodaném“ stavu a u vzorku po laboratorním žíhání. U těchto vzorků byly také zkoumány změny mechanických vlastností pomocí tahové zkoušky, zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti. Na závěr se zkoumalo chemické složení vměstku a jejich rozložení v matici.

Klíčová slova

Duplexní ocel, X2CrNiMoN22-5-3, struktura, mechanické vlastnosti, vměstky.

ABSTRACT

This thesis is focused on the stainless austenitic-ferritic duplex steel X2CrNiMoN22-5-3. The theoretical part focuses on the selection duplex steel, their production and subsequent processing. In the practical part going changes in the structure compared with a sample of duplex stainless steel in a basic as-received state and sample after lab annealing. These samples were also examined changes in the mechanical properties by tensile testing, hardness testing and microhardness. Finally, it was examined the chemical composition of inclusions and their distribution in the matrix.

Key words

Duplex steel, X2CrNiMoN22-5-3, structure, mechanical properties, inclusions.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petru Jonštovi, Ph.D., Ing. Petře Váňové, Ph.D., Ing. Jiřině Vontorové, Ph.D., Ing. Kateřině Konečné, a paní Naděždě Brychtové za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a odborné pomoci v průběhu její praktické části.

OBSAH

ABSTRAKT	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
1 ROZDĚLENÍ DUPLEXNÍCH OCELÍ	11
1.1 Charakteristika duplexních ocelí	11
1.1.1 Rozdělení podle chemického složení	11
1.1.2 Rozdělení podle PREN faktoru	13
1.2 Vliv legujících prvků	14
1.2.1 Uhlík	14
1.2.2 Chrom	15
1.2.3 Nikl	16
1.2.4 Molybden.....	16
1.2.5 Mangan	17
1.2.6 Křemík.....	17
1.2.7 Měď	17
1.2.8 Dusík.....	17
2 METALURGIE DUPLEXNÍCH OCELÍ.....	18
2.1 Primární procesy	18
2.1.1 Metalurgické procesy v elektrických obloukových pecích	18
2.1.2 Metalurgické procesy v elektrických indukčních pecích	19
2.2 Sekundární procesy metalurgie.....	19
2.2.1 Ladle furnace - Pánvová pec (LF)	20
2.2.2 Argon-Oxygen decarburisation – Argon-kyslíkové oduhličení (AOD).....	21
2.2.3 Pochod CLU	21
2.2.4 Vakuum degassing – Vakuové odplynění (VD).....	21
2.2.5 Vacuum Oxygen Decarburisation – Vakuově – kyslíkové oduhličení (VOD) ..	22
2.2.6 Vakuum Arc Degassing – Vakuově – obloukové odplynění (VAD)	22
3 TVÁŘENÍ A TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	23
3.1 Tváření za tepla.....	23
3.2 Tváření za studena	24
3.3 Tepelné zpracování	25

3.3.1	Sigma fáze	26
4	APLIKACE DUPLEXNÍCH OCELÍ	27
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
5.1	Chemické složení	29
5.2	Strukturně fázová analýza	29
5.3	Analýza vměstků	35
5.4	Tahová zkouška	36
5.5	Tvrdost a mikrotvrdost	36
ZÁVĚR		38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		39
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ		40

ÚVOD

Duplexní oceli patří mezi korozivzdorné kovové materiály s dvoufázovou strukturou. Jsou to vysoce legované konstrukční materiály vyvinuté pro použití v agresivních prostředích, například v potravinářském, zdravotnickém a chemickém průmyslu nebo pro stavby v přímořských oblastech.

Ve Švédsku v třicátých letech 20. století byly vyvinuty první duplexní oceli, jako řešení problému s nízkou korozivzdorností chladících systémů v papírenském průmyslu. Pro zlepšení vlastností byl do ocelí přidán chrom, nikl a molybden. V sedmdesátých letech 20. století se objevily duplexní oceli druhé generace, ve kterých byl navíc použit dusík pro zlepšení houževnatosti v ovlivněných oblastech okolo sváru. Tyto oceli byly používány při těžbě ropy a zemního plynu v Severním moři, hlavně se využívaly pro výrobu potrubí, čerpadel a stavebních dílů těžebních plošin.

V dnešní době duplexní (feriticko-austenitické) oceli stále více nahrazují austenitické korozivzdorné oceli díky lepší korozní odolnosti a vyšší pevnosti. Vysoká pevnost těchto ocelí umožnila zmenšení tloušťek stěn a snížení hmotnosti zařízení. Díky menším rozměrům se zlepšuje manipulace, snižují se náklady na pořízení a zároveň celkové zatížení životního prostředí.

1 ROZDĚLENÍ DUPLEXNÍCH OCELÍ

Duplexní oceli se mohou dělit podle chemického složení, podle poměru fází austenit/ferit, nebo podle PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) indexu odolnosti proti bodové korozi.

1.1 Charakteristika duplexních ocelí

Duplexní oceli patří mezi korozivzdorné kovové materiály. Struktura je dvoufázová feriticko-austenitická, požadovaného poměru těchto fází se dosahuje přidáním určitého množství legur. Pro tvorbu feritu se přidávají do ocelí takzvané feritotvorné prvky, jako je chrom, molybden, křemík a další. Pro tvorbu austenitu se přidává nikl, mangan a dusík. Ideální poměr těchto fází je 50/50, ale většinou bývá poměr ve prospěch feritu.

Obsah legujících prvků se u jednotlivých druhů duplexních ocelí liší, ale zpravidla obsahují pod 0,01 % uhlíku, 20–30 % chromu, 3–8 % niklu, 2–5 % molybdenu a dalších legujících prvků například křemíku, manganu, mědi a dusíku. Obsah fosforu a síry, jejíž působení je v oceli bráno jako negativní, se obvykle v duplexních ocelích pohybuje pod 0,035 % fosforu a 0,01 % síry.

Duplexní oceli v sobě spojují vlastnosti austenitických a feritických korozivzdorných ocelí. Ve srovnání s austenitickými korozivzdornými ocelmi mají až dvojnásobné pevnostní charakteristiky a vyšší korozní odolnost. Dalšími pozitivy jsou nižší náchylnost ke zcitlivění, vyšší odolnost proti praskání za napětí v chloridových roztocích a také jsou dobře svařitelné. Dvoufázovost přináší i negativa – například častý rozvoj anizotropie, náchylnost ke křehnutí po žíhání za teploty 475 °C, možné křehnutí vlivem precipitace fáze σ při vytvrzování za teploty 700–1000 °C a výraznou přechodovou oblast při vrubové houževnatosti za vyšších obsahů feritu.[1].

1.1.1 Rozdělení podle chemického složení

V Tab. 1 jsou uvedeny nejpoužívanější druhy korozivzdorných duplexních ocelí a jejich chemické složení. Jejich základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 2 [1, 5, 7, 8].

Tab. 1: Vybrané duplexní oceli a jejich chemické složení [5 - 7].

Název podle EN	Označení podle		Obsah prvku (hm. %)							
	EN	USN	C	Si	Mn	N	Cr	Mo	Ni	Jiné
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	2205	≤0,03	≤1	≤2	0,1 - 0,2	21 - 23	3 - 3,5	4,5 - 6,5	
X2CrNiN23-4	1.4362	2304	≤0,03	≤1	≤2	0,05 - 0,2	22 - 24	0,10 - 0,6	3,5 - 5,5	Cu: 0,1 - 0,6
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	2750	≤0,03	≤1	≤2	0,25 - 0,35	24 - 26	3 - 4	6 - 8	
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	2550	≤0,03	≤0,7	≤2	0,2 - 0,3	24 - 26	3 - 4	6 - 8	Cu: 1 - 2,5
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	2760	≤0,03	≤1	≤1	0,2 - 0,3	24 - 26	3 - 4	6 - 8	Cu: 0,5 - 1 W: 0,5 - 1
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	1500	≤0,03	1,4 - 2	1,2 - 2	0,05 - 0,1	18 - 19	2 - 3	4,5 - 5,2	
X2CrNiCuN23-4	1.4655		≤0,03	≤1	≤2	0,05 - 0,2	22 - 24	0,1 - 0,6	3,5 - 5,5	Cu: 1 - 3
X2CrNiMoN27-6-5	1.4658	2707	≤0,03	≤0,5	≤1,5	0,3 - 0,5	26 - 28	4 - 6	6 - 7	Co: 1
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	2101	0,03	≤1	4 - 6	0,15 - 0,25	21 - 22	0,1 - 0,8	1,5 - 2	

Tab. 2: Základní mechanické vlastnosti vybraných duplexních ocelí [5 - 7].

Název podle EN	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	KV (J.cm ⁻²)	A (%)	HB (-)
X2CrNiMoN22-5-3	650 - 900	450-500	120-200	20-30	280
X2CrNiN23-4	600 - 850	400-450	100-120	20-25	270
X2CrNiMoN25-7-4	750 - 1000	500-550	100-150	15-25	300
X2CrNiMoCuN25-6-3	700-950	500-550	100-150	20-25	290
X2CrNiMoCuWN25-7-4	750 - 950	530-550	90-100	20-25	300
X2CrNiMoSi18-5-3	650-900	400-450	100	25-30	260
X2CrNiCuN23-4	600-850	400-420	100-130	20-25	300
X2CrNiMoN29-7-2	950-1100	700-800	250	25-30	410
X2CrMnNiN21-5-1	650-800	450-550	100-150	30	280

1.1.2 Rozdělení podle PREN faktoru

Toto číslo je odvozeno s chemického složení oceli, udává odolnost proti bodové korozi nebo odolnost oceli v prostředí, které obsahuje chloridy [1, 3].

Vypočet indexu PREN vychází ze vztahu:

$$PREN = \%Cr + 3,3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N \quad (1)$$

Na základě tohoto čísla se duplexní oceli dělí do následujících skupin, které jsou uvedeny v Tab. 3 [3, 8]:

- Lean duplex - duplexní ocel ochuzená o molybden
- Standart duplex – standartní materiál s obsahem prvků okolo 22 % Cr a 3 % Mo
- Super duplex – vylepšený materiál s obsahem prvků okolo 25 % Cr a 3 % Mo, s PREN indexem 40-45
- Hyper duplex – vysoce legovaný materiál s vyšším obsahem chromu a molybdenu než super duplex, PREN index více než 45

Tab. 3: Rozdělení duplexních ocelí podle PREN [8].

Skupina duplexních ocelí	Označení EN	Označení USN	PREN
Lean	1.4655		25-27
	1.4162	2101	25-27
	1.4362	2304	25-28
Standart	1.4462	2205	35-36
Super	1.4507	2550	39-41
	1.4410	2750	40-43
	1.4501	2760	40-43
Hyper	1.4658	2707	49-50

1.2 Vliv legujících prvků

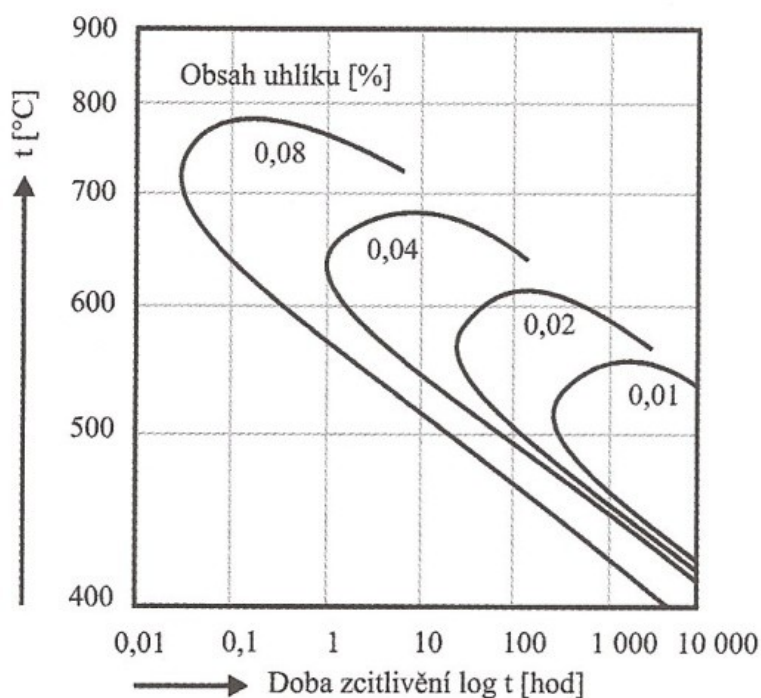
Legující prvky se dělí podle toho, jaký mají vliv na strukturu oceli, a to na feritotvorné nebo austenitotvorné. Lze je také rozdělit podle toho, jaký mají vliv na vlastnosti a strukturu oceli. V duplexních ocelích má nejdůležitější vliv chrom, který určuje korozní odolnost [2, 12].

1.2.1 Uhlík

Patří mezi austenitotvorné prvky. Má podstatný vliv na vlastnosti ocelí, významně ovlivňuje například pevnost (s rostoucím obsahem uhlíku stoupá pevnost, ale klesá plasticita a s tím spojená houževnatost), tvrdost, prokalitelnost a svařitelnost.

V korozivzdorných ocelích až na martenzitické obvykle bývá obsah uhlíku v setinách až desetínách procent. Nízký obsah uhlíku zajišťuje precipitaci velmi jemných karbidů (chromu, vanadu, wolframu), které zvyšují tvrdost a pevnost ocelí. Při vyšším obsahu uhlíku může docházet k mezikrystalové korozi vlivem tzv. zcitlivění. Zcitlivěním je myšleno křehnutí při žhání (400–500 °C), při kterém dochází k precipitaci karbidů a ochuzení hranic zrn o chrom. Pro zvýšení odolnosti proti mezikrystalové korozi se používají na legování oceli prvky s vyšší afinitou k uhlíku, než má chrom – například Ti, Ta, Va, Nb, Zr, W. Pokud k vytvoření karbidů chromu dojde (při tuhnutí odlitku, po svařování atd.), využívá se k jejich odstranění rozpouštěcího žhání. To spočívá v ohřátí na poměrně vysoké teploty (až 1150 °C) a následném prudkém ochlazení ve vodě.

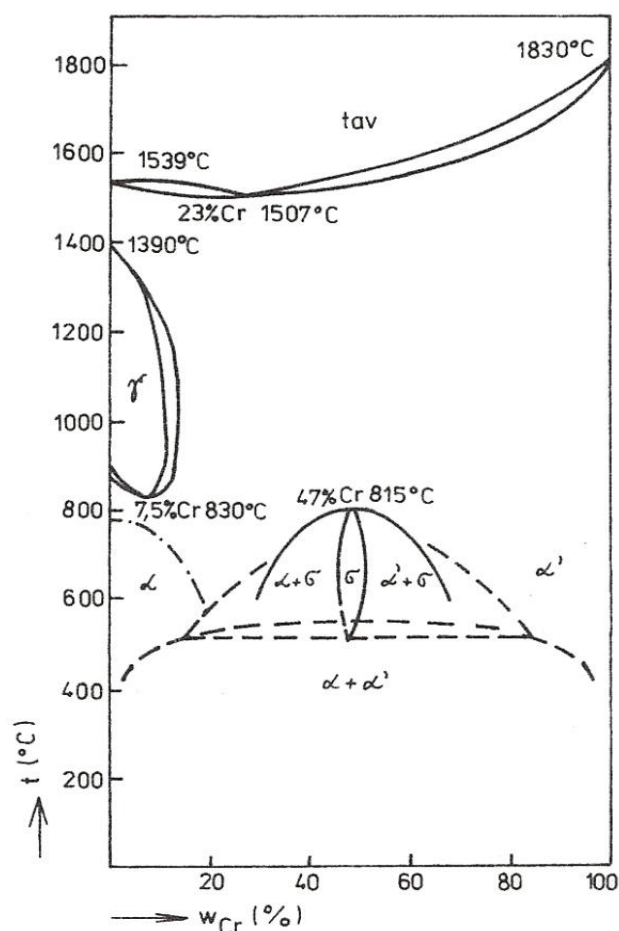
Vliv obsahu uhlíku, teploty a doby na zcitlivění korozivzdorné oceli k mezikrystalové korozi při ohřevu znázorňují takzvané Rollasonovy křivky (Obr. 1) [2, 3, 8, 12].



Obr. 1: Vliv obsahu uhlíku na vznik mezikrystalové koroze v závislosti na teplotě a čase [3].

1.2.2 Chrom

Chrom patří mezi feritotvorné prvky, zvětšuje oblast působení feritu a zmenšuje oblast austenitu, jak je patrné s rovnovážného diagramu Fe-Cr (Obr. 2). Oceli se považují za korozivzdorné, pokud obsahují alespoň 12 % chromu. Toto množství chromu zajišťuje vytvoření pasivační vrstvy, která zajišťuje povrchu oceli odolnost proti korozi, zamezuje šíření kyslíku a koroze dále do struktury. Tato ochrana se zlepšuje se zvyšujícím se množstvím chromu až do obsahu 30 % v matrici. Zvyšování množství chromu sebou přináší nebezpečí tvorby intermetalických fází Fe-Cr, například σ -fáze, které vzniká za teploty okolo 700 °C a má negativní vliv na korozní a mechanické vlastnosti.



Obr. 2: Rovnovázný diagram Fe-Cr [1].

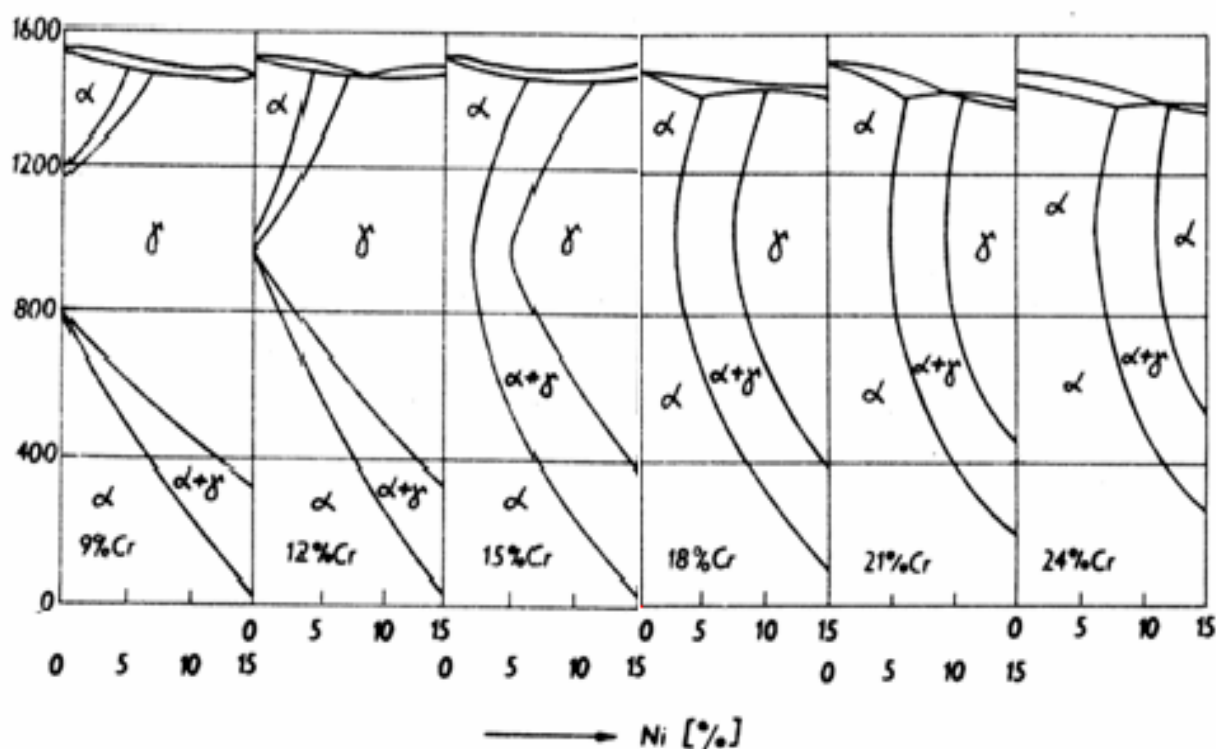
Chrom s uhlíkem při teplotě 700–1000 °C vytváří nestabilní karbidy Me_3C , které mají tendenci se zvětšovat a přetvářet na karbidy typu Me_{23}C_6 . Precipitací těchto karbidů dochází k ochuzování hranic austenitu o chrom, což může ovlivnit korozní odolnost oceli a může dojít například k mezikrystalové korozi.

Dále chrom zvyšuje pevnost matrice, prokalitelnost austenitu, ořezuvzdornost a žáruvzdornost ocelí [2, 8, 12].

1.2.3 Nikl

Nikl se řadí mezi austenitotvorné prvky. Výrazně stabilizuje oblast austenitu a snižuje teplotu A_{c1} , díky tomu se při vysokých obsazích niklu dá dosáhnout plně austenitické struktury. Rovněž zvyšuje korozní odolnost ocelí a to i v některých redukčních kyselinách (chlorovodíková, fosforečná). V kombinaci s chromem zvyšuje plasticitu a houževnatost, tím zlepšuje tvářitelnost za normálních i nízkých teplot. Se zvyšujícím obsahem niklu ve struktuře roste žárupevnost ocelí. Kvůli poměrně vysoké ceně niklu se v současné době nahrazuje levnější kombinací manganu a dusíku.

V rovnovážném diagramu Fe-Cr-Ni (Obr. 3) posouvá nikl eutektoidní bod doleva a k nižším teplotám. S tímto účinkem niklu je potřeba počítat při žihání niklových ocelí naměkko. Při tepelném zpracování zvyšuje nikl prokalitelnost. Zvýšení je však podstatně menší než v případě manganu nebo chromu [2, 8, 12].



Obr. 3: Řezy diagramem Fe-Cr-Ni s obsahy chromu 9 %, 12 %, 18 %, 15 %, 21 %, 24 % [1].

1.2.4 Molybden

Molybden patří mezi feritotvorné prvky a je zároveň karbidotvorný. Část tvoří cementit typu $(Fe,Mo)_3C$ kde mohou být rozpuštěna až 4 % molybdenu, další část se rozpouští ve feritu, čímž zvyšuje jeho tvrdost. V soustavě Fe-C-Mo se posouvá eutektoidní bod doleva a do vyšších teplot, čímž zmenšuje oblast gama (austenitu). Zvyšuje prokalitelnost hlavně v kombinaci s chromem, odolnost proti korozi (bodové a štěrbinové), chemickým vlivům, žárupevnost a snižuje vývin popouštěcí křehkosti [2, 8, 12].

1.2.5 Mangan

Mangan je austenitotvorný prvek, který má dobrou rozpustnost jak v austenitu tak feritu. Přítomnost manganu v oceli zvyšuje tvrdost při malém snížení houževnatosti (tvárnosti). Zvyšuje prokalitelnost oceli a má také dezoxidační účinky. Ve slitinách Fe-Mn-C je část manganu rozpuštěna v základní kovové matici (tj. ve feritu nebo austenitu) a část tvoří podvojný karbid $(\text{Fe,Mn})_3\text{C}$ [2, 8, 12].

1.2.6 Křemík

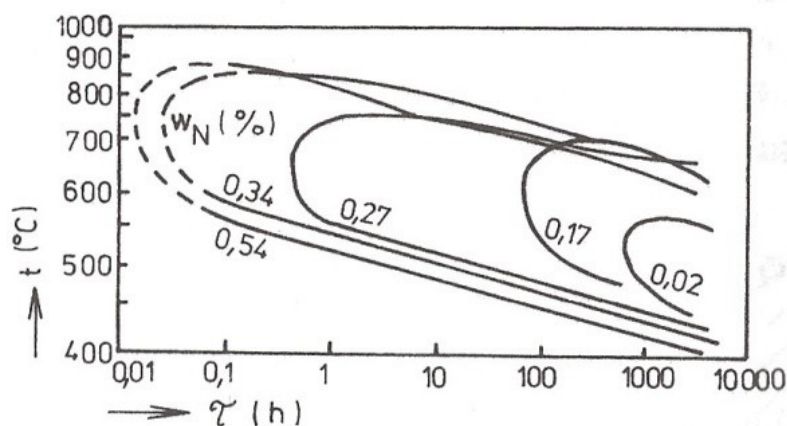
Křemík je silně feritotvorný prvek, který je ve feritu dobře rozpustný za normálních teplot až 14 %. V ocelích zvyšuje odolnost proti korozi (hlavně proti bodové a štěrbinové) a žaruvzdornost. Také zvyšuje pevnost feritu za slabšího zhoršení tvářitelnosti a houževnatosti, dále ještě zhoršuje tepelnou a elektrickou vodivost. V soustavě Fe-C-Si křemík zmenšuje oblast fáze γ a také posouvá eutektoidní bod doleva a k vyšším teplotám. Při tepelném zpracování je proto nutné počítat se zvyšováním transformačních teplot. Křemík v ocelích do obsahu 0,5 % není považován za legující prvek, ale za dezoxidační činidlo [2, 8, 12].

1.2.7 Měď

Měď je slabě austenitotvorný prvek, se schopností stabilizovat austenitickou matici. Při obsahu do 0,3 % zlepšuje prokalitelnost, do obsahu 0,5 % zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi, ale nad obsah 0,6 % je spíše nežádoucí, protože zhoršuje svařitelnost, houževnatost a může zapříčinit vznik povrchových prasklin. V korozivzdorných ocelích zlepšuje odolnost proti působení kyseliny sírové, fluorovodíkové a chlorovodíkové [2, 8, 12].

1.2.8 Dusík

Dusík patří mezi silně austenitotvorné prvky. V korozivzdorných ocelích bývá obsažen maximálně do 0,3 %, toto množství zvyšuje pevnost v kluzu a tahu, odolnost proti bodové a štěrbinové korozi. Při vyšším obsahu může způsobovat mezikrystalovou korozi (Obr. 4). Jak již bylo zmíněno, v kombinaci s manganem je schopen nahradit nikl [2, 8, 12].



Obr. 4: Vliv dusíku na oblast zcitlivění k mezikrystalové korozi u oceli podrobené rozpouštěcímu žihání při teplotě 1150 °C [1].

2 METALURGIE DUPLEXNÍCH OCELÍ

Výroba duplexních ocelí se dělí na primární a sekundární metalurgicko technologické výrobní procesy.

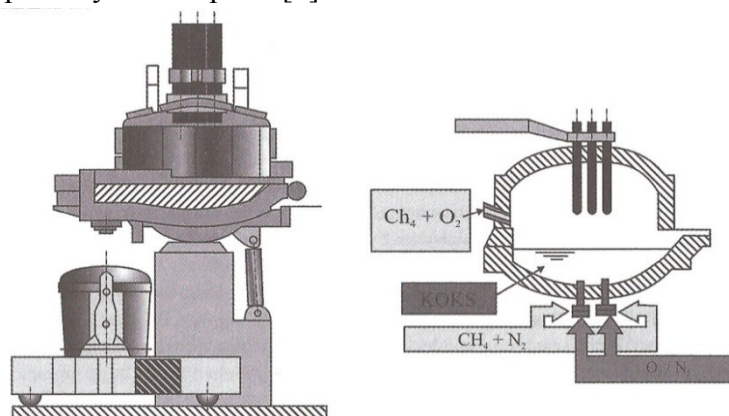
2.1 Primární procesy

Primární procesy metalurgie, které se zabývají výrobou základní taveniny, se provádí většinou v elektrických obloukových pecích (EOP), nebo v elektrických indukčních pecích (EIP).

2.1.1 Metalurgické procesy v elektrických obloukových pecích

Vsázku do elektrických obloukových pecí (Obr. 5) tvoří nelegovaný ocelový odpad a legovaný vratný odpad, který se kontroluje kvůli obsahu uhlíku, fosforu a síry. Po roztavení vsázky se odebírá vzorek taveniny, který se odlíje do formy. Z tohoto vzorku se chemickou analýzou např. na spektrometru stanovuje množství prvku C, Cr, Ni, Mo, Mn, Si, N, S, F v kovu. Na základě tohoto měření se upravuje jejich množství v tavenině. Pro zvýšení obsahu chromu se do taveniny přidává silikochrom a po dosažení teploty 1620 °C se začíná dmýchat kyslík pro snížení uhlíku, který přechází na oxid uhličitý.

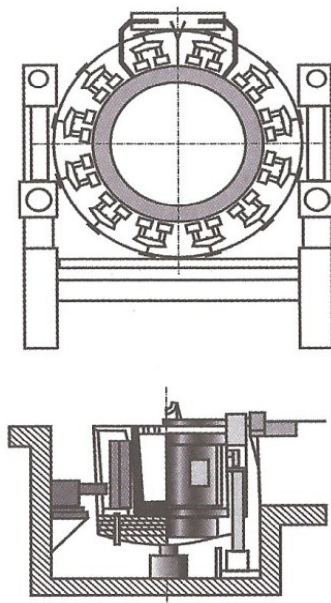
Dmychání kyslíku začíná, jakmile se objeví uhlíkový var, ten se pozná podle výrazných plamenů. Je důležité, aby během dmýchání neklesl tlak kyslíku pod 0,7 MPa. Když začne houstnout struska (což signalizuje oxidaci chromu), množství uhlíku klesne pod 0,1 %, následkem čehož klesne množství vzniklého oxidu uhelnatého a klesá výška plamenů, se přestává do pece postupně dmýchat kyslík. Pro dosažení obsahu uhlíku 0,05 % je potřeba, aby po dmychání byla teplota v peci nad 1900 °C. Během oxidace je možný pokles chromu v oceli propalem až o 3 %, tento chrom přechází do strusky ve formě oxidu chromu. Dalším přidáním silikochromu se tyto oxidy chromu dezoxidují a vrací se zpět do taveniny. Poté se stáhne struska tak, aby zbylo jen takové množství, které pokryje plochu taveniny a zabránilo její oxidaci. Po odebrání strusky se provede další zkouška na zjištění obsahu prvků. Na základě této zkoušky se dodá do taveniny ferochrom, čímž se zvedne obsah uhlíku nad 0,1 % a legury pro konečný stav obsahu prvků. Zkouška se zopakuje a na základě množství prvku v oceli se vypočítá odpichový čas a teplota [3].



Obr. 5: Elektrická oblouková pec [3].

2.1.2 Metalurgické procesy v elektrických indukčních pecích

Metalurgické procesy v indukčních pecích (Obr. 6) a obloukových pecích se příliš od sebe neliší. Vsázka se skládá z ocelových nízkolegovaných a legovaných šrotových odpadů a dalších feroslitin. Kvůli náchylnosti k vysokému propalu chromu při tavbě, který je ovlivněn množstvím železných oxidů, je potřeba odpady od těchto oxidů otryskávat. Indukční pece jsou schopné vyrobit korozivzdorné ocele s obsahem pod 0,03 % uhlíku. Této hodnoty jde v EIP dosáhnout, protože zde nedochází k nauhličení taveniny kvůli rozpouštění uhlíkových elektrod. Díky menší velikosti tavby je proces rychlejší a ekonomičtější, proto je menší spotřeba energie a propal legujících prvků. Nedostatky této metody jsou vyšší nároky na chemické složení, velikost, kusovitost a čistotu vsázky [3].



Obr. 6: Elektrická indukční pec [3].

2.2 Sekundární procesy metalurgie

Sekundární metalurgické procesy se provádí za účelem dolegování, dezoxidace, oduhličení a rafinace základní taveniny na požadované chemické složení, aby vznikly co nejlepší vlastnosti a struktura oceli. Každá metoda má své výhody a nevýhody (zobrazeno v Tab. 4), většinou se propojuje i několik sekundárních procesů.

Postupy prováděné za atmosférického tlaku:

- AP (Argon Pouring) – Dmýchání argonu
- LF (Ladle Furnace) - Pánvová pec
- AOD (Argon Oxygen Decarburisation) – Argon- kyslíkové oduhličení
- CLU (Creusot Loire – Udelboholm) – název podle místa prvních použití

Postupy prováděné ve vakuu:

- VD (Vakuum Degassing) - Vakuové odplynění
- VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation) – Vakuově-kyslíkové oduhličení
- VAC (Vakuum Arc Degassing) – Vakuově-obloukové odplynění

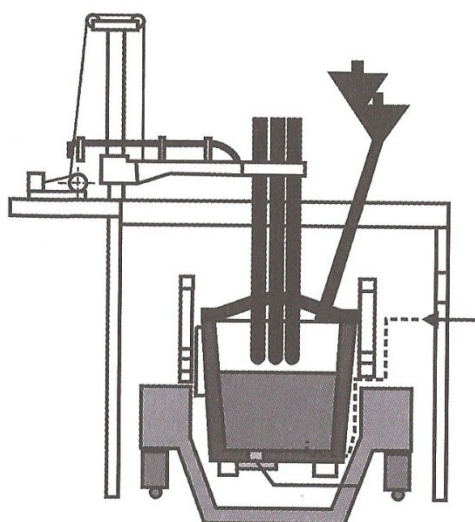
Tab. 4: Metalurgické možnosti některých sekundárních postupů [3].

Postup mimopecní rafinace oceli		Snížení obsahu				Teplotní a chemická homogenizace	Přesné legování	Řízená dezoxidace	Zvýšení mikročistoty	Modifikace vměstku	Ohřev oceli
		C	S	H	N						
Dmýchání inertních plynů	AP	n	n	č	č	a	č	n	č	n	n
Ohřev oceli pod aktivní struskou	LF	n	a	n	n	a	a	a	a	a	n
Vakuové zpracování oceli	VAD	a	a	a	č	a	a	a	a	n	a
Oxidační vakuování	VOD	a	n	a	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí Ar-O	AOD	a	č	č	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí H ₂ O-O	CLU	a	č	č	č	a	a	a	č	č	č

Vysvětlivka: a – ano, n – ne, č – částečně.

2.2.1 Ladle furnace - Pánvová pec (LF)

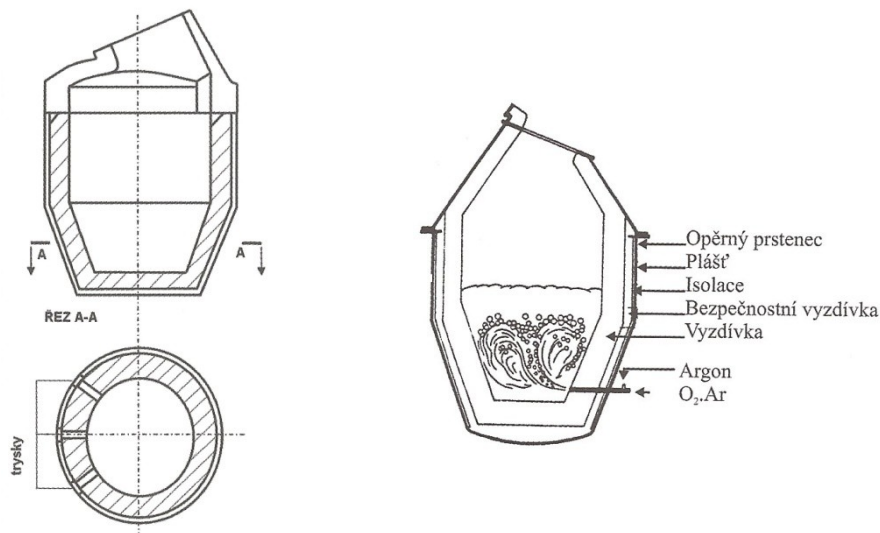
Pánvové pece (Obr. 7) se často vyrábějí rekonstrukcí obloukových pecí a jsou jedny z nejčastěji používaných sekundárních procesů. Pánvové pece slouží jako mezistupeň k přesunu redukční fáze z EOP k jiným sekundárním procesům, nebo do lící pánve. Během tohoto přesunu se provádí částečná dezoxidace, odsíření (až pod 0,003 % S), homogenizace teploty a přesné dolegování taveniny. Pro dosažení co nejvyššího stupně odsíření se jako vyzdívka používá magnezitové nebo dolomitové zdivo. Během úpravy kovu se teplota ohřevu nastavuje na 5 °C/min a dmýchají se inertní plyny (argon nebo dusík) [3].



Obr. 7: Schéma pánvové pece [3].

2.2.2 Argon-Oxygen decarburisation – Argon-kyslíkové oduhličení (AOD)

Tento postup se používá pro taveninu vzniklou v obloukových pecích, která se po natavení přelévá do kyslíkových konvertorů (Obr. 8), touto metodou lze dosáhnout obsahu uhlíku pod 0,03 %. Díky exotermické reakci, která vzniká při dmýchání kyslíku do taveniny, a která pokrývá tepelné ztráty, není nutné používat přehřátou taveninu. V konvertorech dochází ke společnému dmýchání argonu a kyslíku do taveniny, čímž dochází ke snížení koncentrace oxidu uhelnatého, což má za následek snížení koncentrace uhlíku v oceli [3].



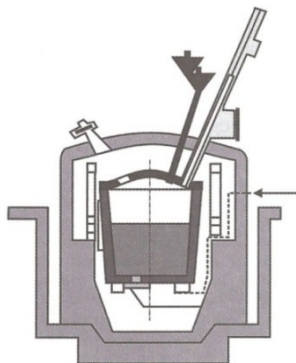
Obr. 8: Schéma AOD konvertoru [3].

2.2.3 Pochod CLU

Podobně jako pochod AOD se nejdříve vsázka nataví v obloukových pecích a rafinace – oduhličení se provádí v konvertorech, kde se tryskami vhání do taveniny směs kyslíku a vodní páry. Ze začátku procesu se jako u AOD vhání čistý kyslík, po dosažení obsahu uhlíku okolo 0,8 % se do proudu kyslíku začne přimíchávat vodní pára. Pára se při styku s roztaveným kovem rozkládá na vodík a kyslík. Vodík zlepšuje snižování koncentrace oxidu uhelnatého a tím zvyšuje oduhličení. Dále také zajišťuje ochlazení taveniny, takže nepřesahuje 1680 °C a nemusí se dodávat pro ochlazení kovový šrot. Pro snížení obsahu vodíku se v závěru rafinace dmýchá čistý argon [3].

2.2.4 Vakuum degassing – Vakuové odplynění (VD)

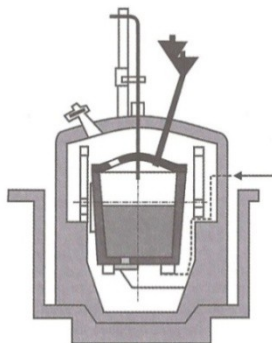
Při této metodě se kov v pánvi zaváže do vakuovatelného prostoru – kesonu (Obr. 9). Ten se uzavírá vzduchotěsným víkem a při omezeném průtoku argonu se sníží tlak pod víkem kesonu. Poté se v celém prostoru pomocí vývěv vytvoří vakuum. Během vakuování se ocel udržuje při tlaku maximálně 2-4 kPa, po dobu 15 min. Snížením tlaku dochází ke zvýšení aktivity uhlíku ke kyslíku, tím se rozběhne reakce mezi uhlíkem a kyslíkem, který je vázaný v oxidických vměstech a rozpuštěný v kovu. Takto dochází k hluboké dezoxidaci kovu uhlíkem, snížení obsahu vodíku i dusíku a celkově vyšší oxidické čistotě oceli díky redukcí oxidu v tavenině. Po dezoxidaci se provádí dolegování [3].



Obr. 9: Schéma vakuování v kesonu [3].

2.2.5 Vacuum Oxygen Decarburisation – Vakuově – kyslíkové oduhličení (VOD)

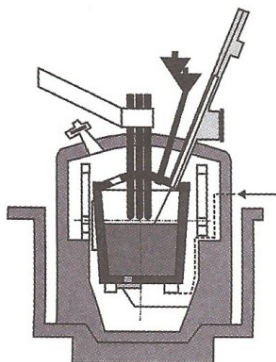
Tato metoda je založena na pochodu VD (vakuové odplynění), navíc se tekutá ocel oduhličuje kyslíkem dmýchaným tryskou na hladinu [3].



Obr. 10: Zařízení pro VOD [3].

2.2.6 Vakuum Arc Degassing – Vakuově – obloukové odplynění (VAD)

Jedná se o technologii, která spojuje primární a sekundární metalurgický pochod. Kombinuje výrobu oceli v elektrické obloukové peci, která je uložena ve vzduchotěsném kesonu [3].



Obr. 11: Schéma zařízení pro VAD, kombinuje elektrickou obloukovou pec s vakuovatelným kesonem [3].

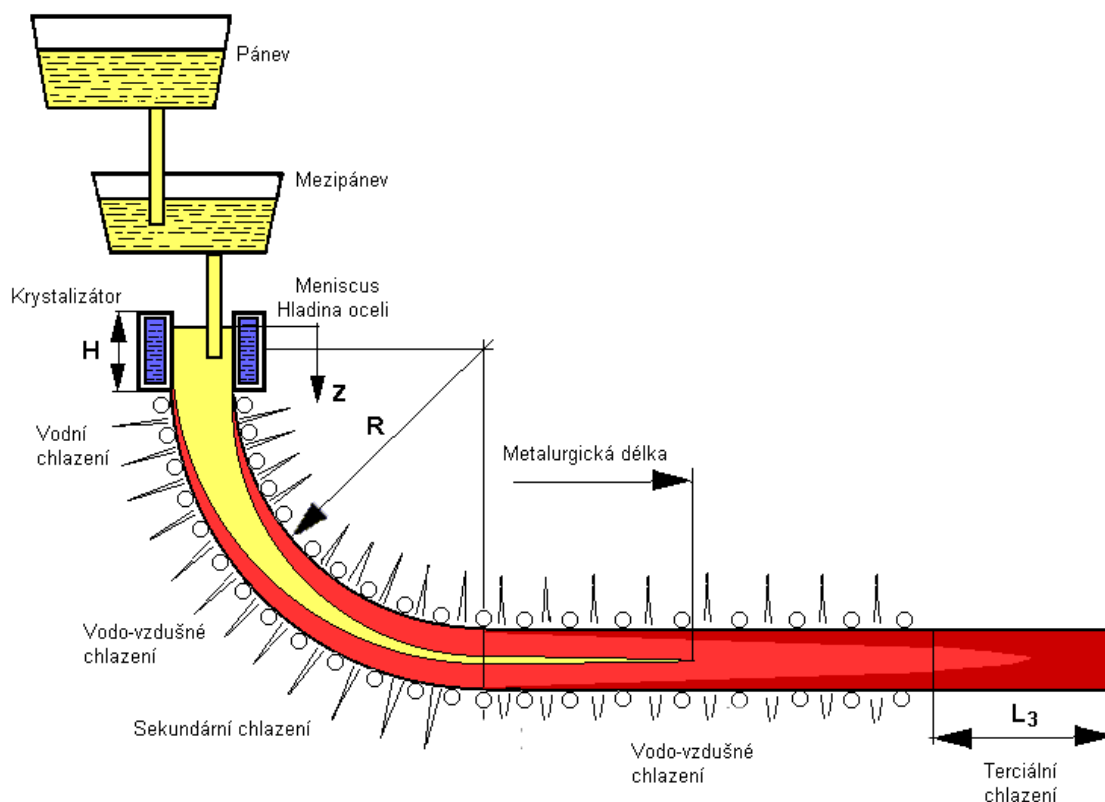
3 TVÁŘENÍ A TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Ocel, která vznikla v EOP nebo konvertorech, může být použita pro odlévání odlitku, kokil nebo bram, které mohou být použity pro tváření za tepla anebo za studena podle požadavku na konečný výrobek.

3.1 Tváření za tepla

Mezi způsoby tváření za tepla se počítá kontinuální lití s následným tvářením, válcování ohřátých bram nebo kování ingotu.

Kontinuální lití (Obr. 11) se používá zejména pro výrobu polotovarů (bramy, sochory), které se dále zpracovávají válcováním na plechy, trubky, tyče, dráty, nebo jinak tvarované výrobky. V pecích roztavený kov se přelévá do pánve, kterou se zásobuje zásobník kontinuálního pece.



Obr. 12: Schéma kontinuálního (plynulého) odlévání [10].

Teplota pro tváření za tepla se nachází v oblasti nad 950 °C. Duplexní oceli se musí zvolna ohřívat a dbát na to, aby teploty povrchu a středu polotovaru nebyly příliš rozdílné. Tím se zabrání vzniku vnitřních pnutí a následného popraskání. K tomuto účelu slouží průběžné nebo komorové pece. Příliš pomalý vzestup teploty a dlouhé setrvání na konečné teplotě může mít za následek zhrubnutí zrna.

Pro tváření se používají válcovací tratě (Obr. 13), které se skládají i z několika válcovacích stolic, případně dohřívacích pecí, aby se zamezilo zchladnutí válcovaného kusu. Poklesem teploty se zvyšuje napětí vyvolané pracovními válci a dochází k zvyšování

působících sil na materiál i v materiálu. To může mít za následek popraskání materiálu, nebo zničení tvářecích nástrojů. Během procesu je potřeba dodržovat čistotu tratě a válců, aby se okuje nedostali při válcování do struktury, došlo by tím k narušení struktury a zhoršení materiálových vlastností [1].



Obr. 13: Válcování plechů za tepla [11].

3.2 Tváření za studena

Tvářením za studena (Obr. 14) se získávají vysoce kvalitní povrchy materiálů, protože se vypustí ohřev oceli a nevznikají na ní okuje. Oproti tváření za tepla se musí na tváření za studena vyvinout daleko větší síla a úběry musí být menší. Při tváření za studena dochází ke zvýšení tvrdosti a zpevnění matrice. Aby nedošlo k příliš velkému zpevnění u výrobku, které potřebují několik tvářecích dějů, zařazuje se žhánání při teplotě okolo 1000 °C. Po posledním tváření se žháná na 1050 °C a chladí ve vodě. Před každým žhánáním se povrch musí odmastit, aby nedocházelo k nauhličení povrchu. Při tváření duplexních ocelí musí mít stroje vyšší výkon o 50-80 % a pomalejší chod, než pro tváření obyčejných uhlíkových ocelí [1].



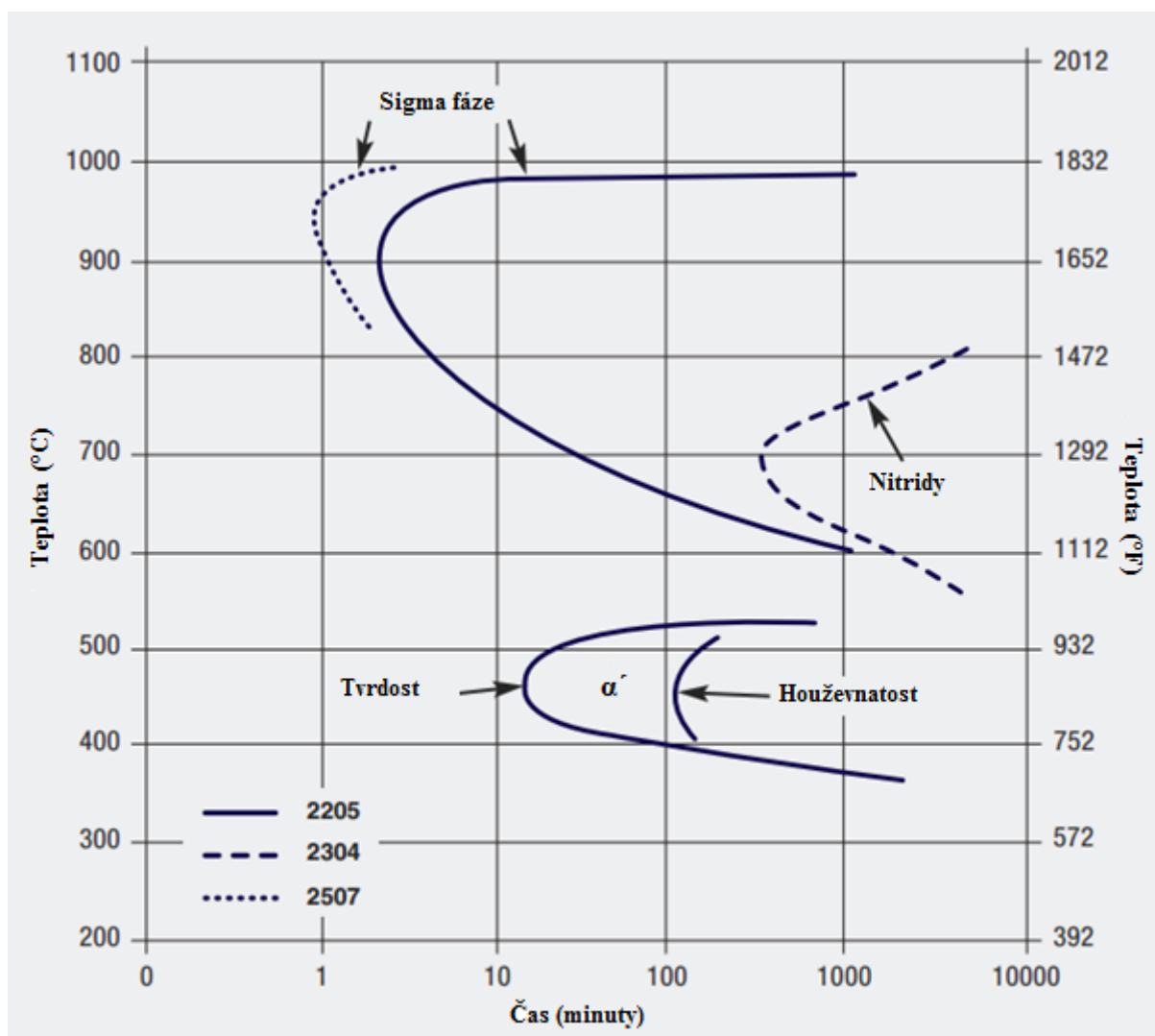
Obr. 14: Válcování za studena [11].

3.3 Tepelné zpracování

U duplexních ocelí kvůli náchylnosti ke vzniku intermetalických fází (Obr. 15) a karbidů za teplot 700-950 °C se provádí rozpouštěcí žíhání, které má za účel převod intermetalických fází a karbidu do tuhého roztoku austenitu a feritu při teplotě žíhání 1000- 1100 °C.

V oblasti teploty 400-500 °C dochází k vytvrzování hlavně feritické fáze s následným s křehnutím, pokud je vydrž na teplotě příliš dlouhá, tomuto procesu se říká stárnutí oceli. Při krátkodobých výdržích se tohoto jevu využívá k zvýšení pevnosti při zachování tažnosti a houževnatosti.

V rozmezí teplot 550-900 °C se na hranicích zrn feritu a austenitu mohou tvořit v duplexních ocelích karbidy typu Me_{23}C_6 , které jsou bohaté na obsah chromu. Čím je vyšší teplota výdrže ohřevu, tím se i zrychluje tvorba karbidů. Tvorba tohoto karbidu a odebrání chromu z feritických zrn může zapříčinit snížení korozivzdornosti a vznik mezikrystalové koroze. [1].



Obr. 15: Precipitační diagram vybraných sekundárních fází u duplexních ocelí [8].

3.3.1 Sigma fáze

Sigma fáze je intermetalická sloučenina vznikající v teplotním rozmezí 600–1000 °C soustavě Fe-Cr na hranicích austenitických zrn. V čistě austenitických ocelích tvorba této fáze trvá několik hodin, oproti tomu v duplexních ocelích je schopna se vyvinout během několika minut. Sigma fáze se převádí do roztoku krátkým ohřevem nad teplotu 1050 °C. Nejvíce vznik sigma fáze urychluje molybden, který se do duplexních ocelí přidává pro zlepšení odolnosti proti bodové korozi. Tato fáze je tvrdší a křehčí než austenit, nemagnetická a má hexagonální mřížku. Má za následek zvýšení pevnosti, tvrdosti, meze kluzu a snížení tažnosti, houževnatosti a korozní odolnosti feritu [1, 8, 12].

4 APLIKACE DUPLEXNÍCH OCELÍ

Jak již bylo řečeno, duplexní oceli byly vyvinuty ve třicátých letech minulého století, aby zlepšily korozní odolnost potrubí pro vedení chladících medií v papírenském průmyslu.

Díky své vyšší pevnosti než austenitické korozivzdorné oceli, vynikající korozní odolnosti a vysokou odolnosti v kyselých prostředích (hlavně obsahující chloridy) se jejich používání rozšířilo do mnoha průmyslových oblastí, jako jsou chemický, papírenský, těžební a potravinářský průmysl. V dnešní době se tyto materiály stále více využívají pro různé stavební a dopravní konstrukce v přímořských oblastech nebo v oblastech s agresivním podnebím.

Odsolování mořské vody představuje jednu z nejtěžších zkoušek materiálů díky korozivním a tepelným procesům, které vznikají chemickou reakcí chloridů za vysokých teplot. Nejdříve se stěny komor vyráběly z uhlíkových ocelí potažených epoxidem, ale přesto nedokázaly odolávat příliš dlouho a byly nahrazeny austenitickými nerezovými oceli. Tyto oceli byly nahrazeny duplexními (feriticko-austenitickými) korozivzdornými oceli, díky své vyšší korozní odolnosti a až dvojnásobně vyšší pevnosti. V důsledku těchto zlepšených vlastností mohou být při výrobě odsolovacích zařízení (Obr. 16) použity tenčí materiály, což sebou přináší další výhody - například menší hmotnost a rozměry, čímž se zlepšuje manipulace se zařízením, také finanční náročnost je nižší a tím se celkově zmenšuje dopad na životní prostředí.

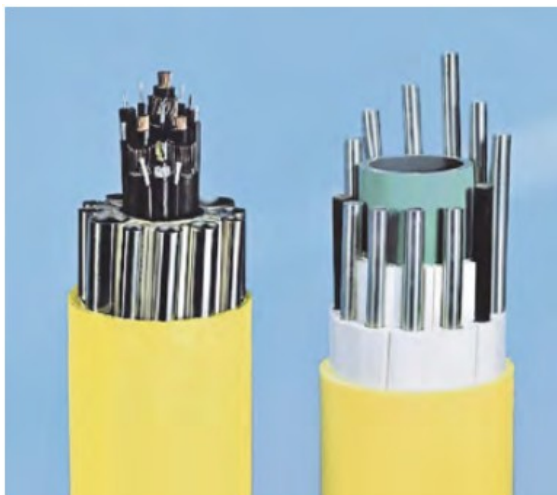
U potrubí pro hlubokomořské vedení ropy (Obr. 17) nebo plynu se jako ochrana před mechanickými a korozními závadami používají prvky ze super duplexních ocelí s PREN indexem minimálně 40, a to pro jejich vysoký stupeň pevnosti a korozní odolnosti.

Čím dál větší uplatnění získávají duplexní nerezové oceli při stavbě mostu, hlavně všude tam kde je potřeba vysoká odolnost proti korozi vyvolané slanými podmínkami a zároveň vysoká nosná síla materiálu, jak dokazují dva asijské případy: most Stonecutter v Hong Kongu (Obr. 18) a Helix Bridge ze Singapuru.

Při výběru materiálu na stavbu střechy Hamadova mezinárodního letiště v Doha (Obr. 19) se muselo vzít v úvahu několik faktorů: letiště se nachází v pouštní oblasti, proto převládá velmi teple počasí, a zároveň leží poblíž moře, takže také působí vlhkost a koroze způsobená solí. Dalšími určujícími faktory byly pevnost a cena. Kvůli těmto vysokým nárokům byla nakonec zvolena korozivzdorná duplexní (austenito-feritická) ocel S32003 [8].



Obr. 16: Více komorové zařízení pro odsolování mořské vody, na výrobu jsou použité duplexní oceli LDX 2101 a 2205 [8].



Obr. 17: Vyztužené potrubí používané v těžebním průmyslu, použita super duplexní ocel 2750 [8].



Obr. 18: Most Stonecutter v Hong Kongu, na stavbu bylo použito přes 2000 tun duplexní oceli 2205 [8].



Obr. 19: Hamadovo mezinárodní letiště v Doha (Katar), na stavbu střešní konstrukce bylo použito 1600 tun duplexní oceli 2003 [8].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem praktické části bylo ověření chemického složení, mechanických vlastností a provedení strukturně fázové analýzy duplexní oceli X2CrNiMoN22-5-3.

Tato ocel byla testována ve dvou různých stavech, a to ve stavu dodaném a ve stavu po laboratorním žihání při režimu 800 °C/ 5 h/ vzduch.

5.1 Chemické složení

Pro zjištění přesného chemického složení byla provedena analýza na optickém emisním spektrometru Spectra Analytik GDA 750 za budících podmínek 700 V a 35 mA. Bylo provedeno měření na pěti místech, jejich průměrem byl stanoven obsah prvků. Zjištěné hodnoty jsou zapsány a porovnány s EN standardem v Tab. 5. Porovnáním bylo zjištěno, že chemické složení vzorků zcela odpovídá evropskému standardu. Obsahy mikrolegur norma neuvádí.

Tab. 5: Chemické složení duplexní oceli X2CrNiMo22-5-3 zjištěné na spektrometru.

Hodnoty zjištěné spektrometrem [hm. %]						
C	Cr	Ni	Mo	S	P	N
0,029	21,8	4,59	3,09	0,013	0,015	0,12
Mn	Si	Co	V	Cu	Ti	B
1,02	0,669	0,111	0,098	0,066	0,005	0,005
Hodnoty udávané EN standardem [hm. %]						
C	Cr	Ni	Mo	S	P	N
≤0,03	21 - 23	4,5 - 6,5	3 - 3,5	≤0,02	≤0,03	0,08 - 0,2
Mn	Si	Co	V	Cu	Ti	B
≤2	≤1	-	-	-	-	-

5.2 Strukturně fázová analýza

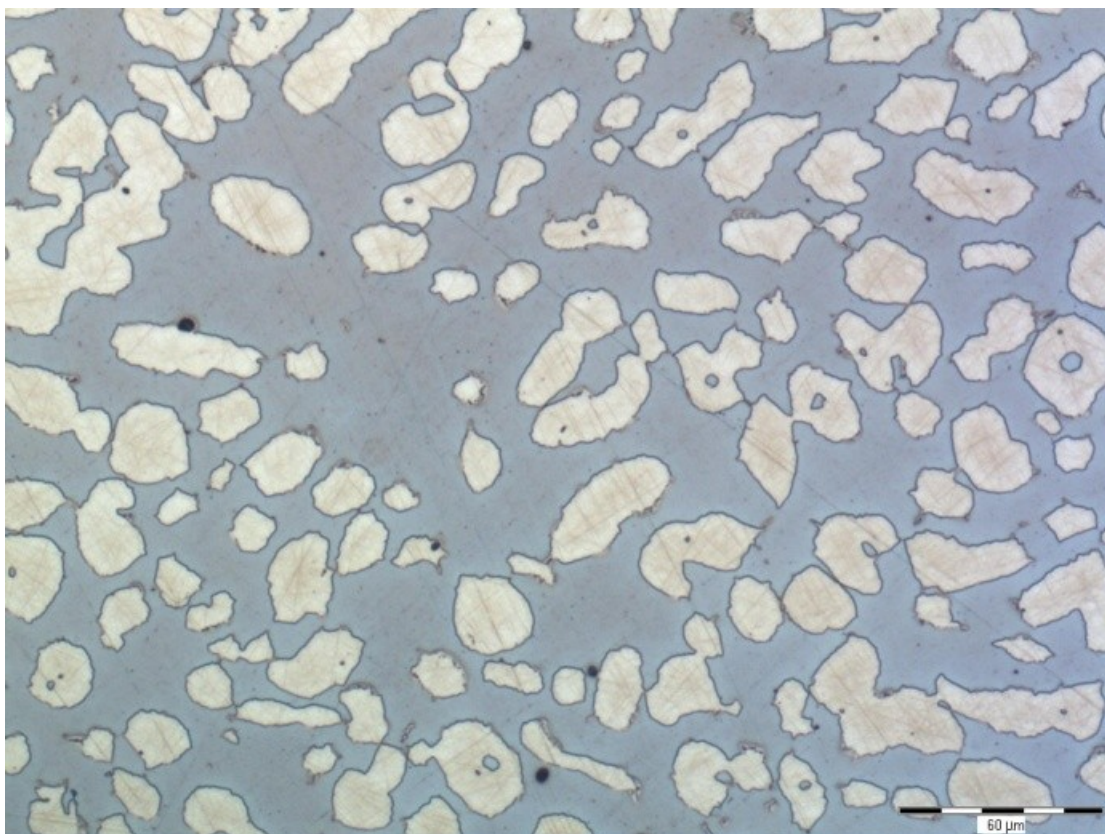
Pro zjištění objemového podílu fází obrazovou metodou, bylo potřeba nejdříve udělat metalografické výbrusy „dodaného“ vzorku a vzorku po laboratorním žihání. Tyto vzorky se umístily do brusné hlavice a obrousily se na kotoučové brusce Abramin od firmy Struers pomocí brusných kotoučů se zrnitostí 1200 a 2000. Následovalo leštění pomocí diamantové emulze s velikostí zrn 9 μm a poté 3 μm. Mikrostruktura vzorku v dodaném stavu byla tvořena feritem a austenitem, a ve stavu po laboratorním žihání feritem, austenitem a sigma fází.

Pro zvýraznění struktury feritu u vzorků (Obr. 20 a 21) se provedlo elektrolytické leptání, které proběhlo na přístroji Struers – Lectropol v deseti molárním roztoku NaCl za napětí 5 V, proudové hustoty 2 A po dobu 7 s. Pro zvýraznění austenitické části matrice se provedlo leptání v kyselině V2 (roztok 100 ml H₂O, 10 ml HCl a 10 ml HNO₃), struktura je znázorněna na Obr. 22 a 23. Na takto připravených vzorcích se na světelném mikroskopu

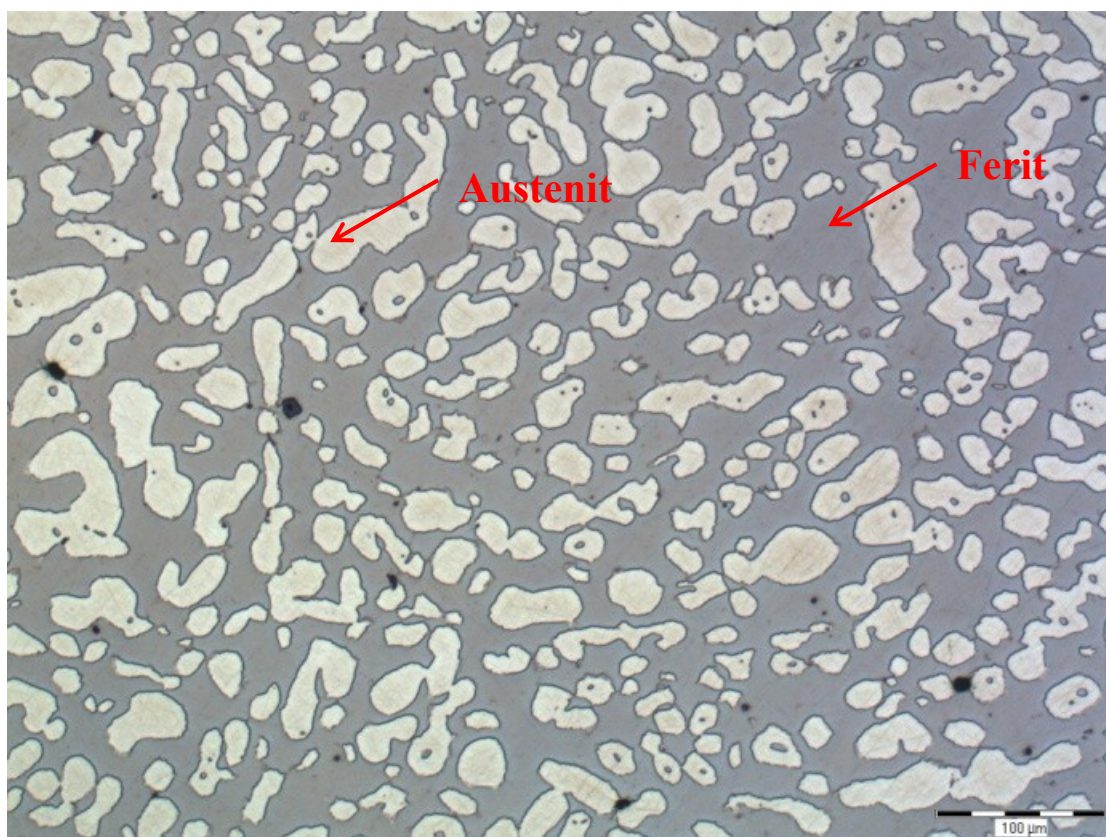
Olympus IX70 vyfotila sérii deseti snímků struktury pro oba vzorky a pomocí programu IMAGE PRO 6.2 se vyhodnotil průměrný objemový podíl jednotlivých fází (Tab. 6).

Tab. 6: Zjištěné podíly fází.

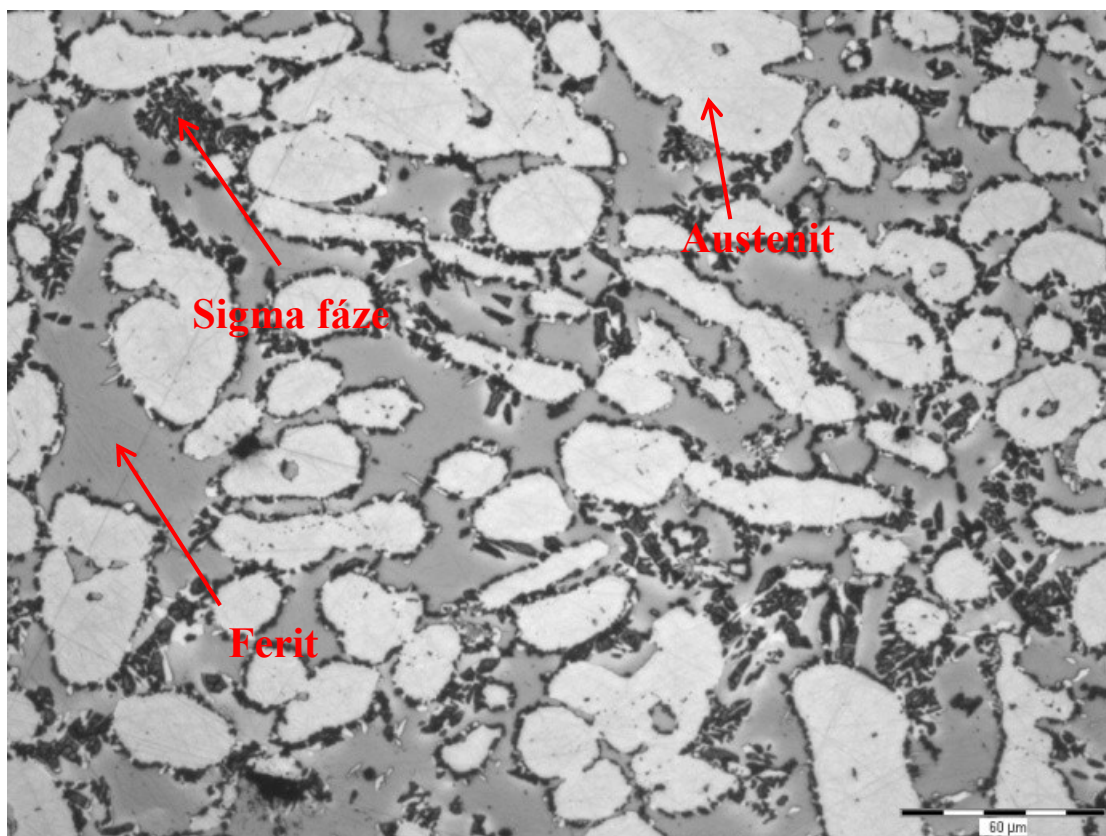
Fáze	„Dodaný“ vzorek [obj. %]	Vzorek „po žíhání“ [obj. %]
Ferit	61,88	46,09
Austenit	38,12	39,31
Sigma	-	14,60



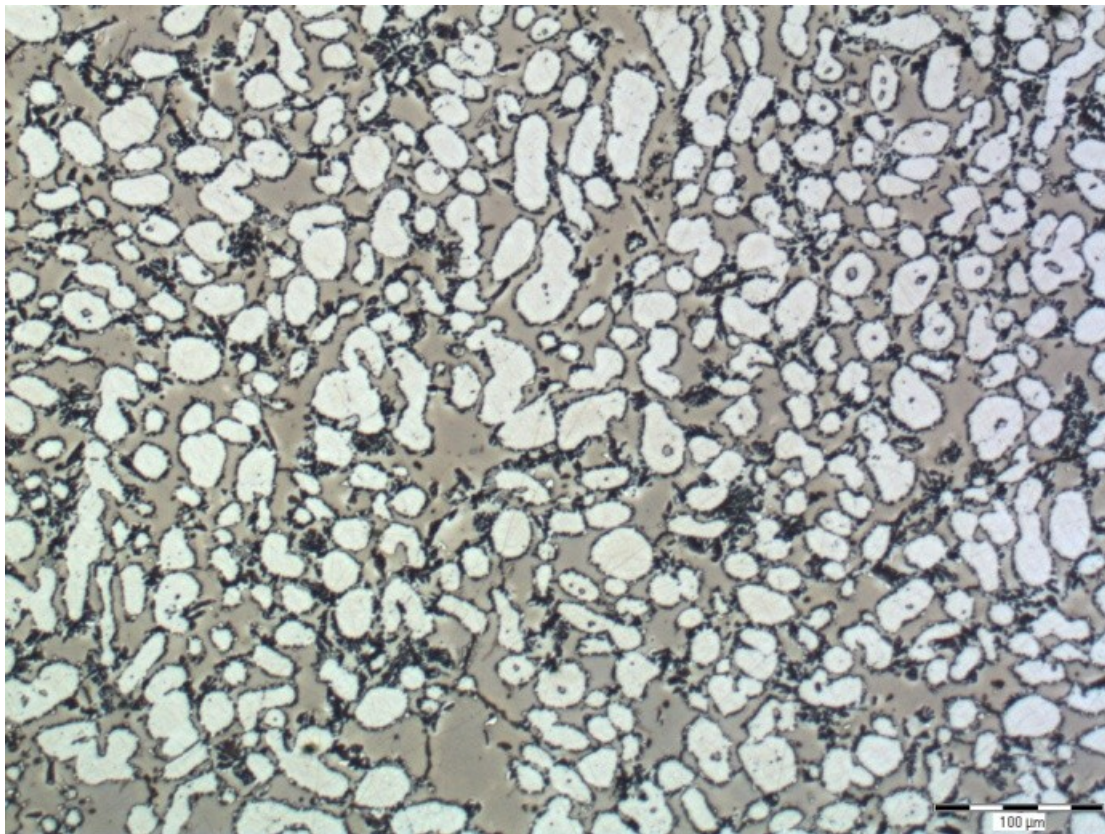
Obr. 20 a: Struktura „dodaného“ vzorku leptaného v roztoku NaOH.



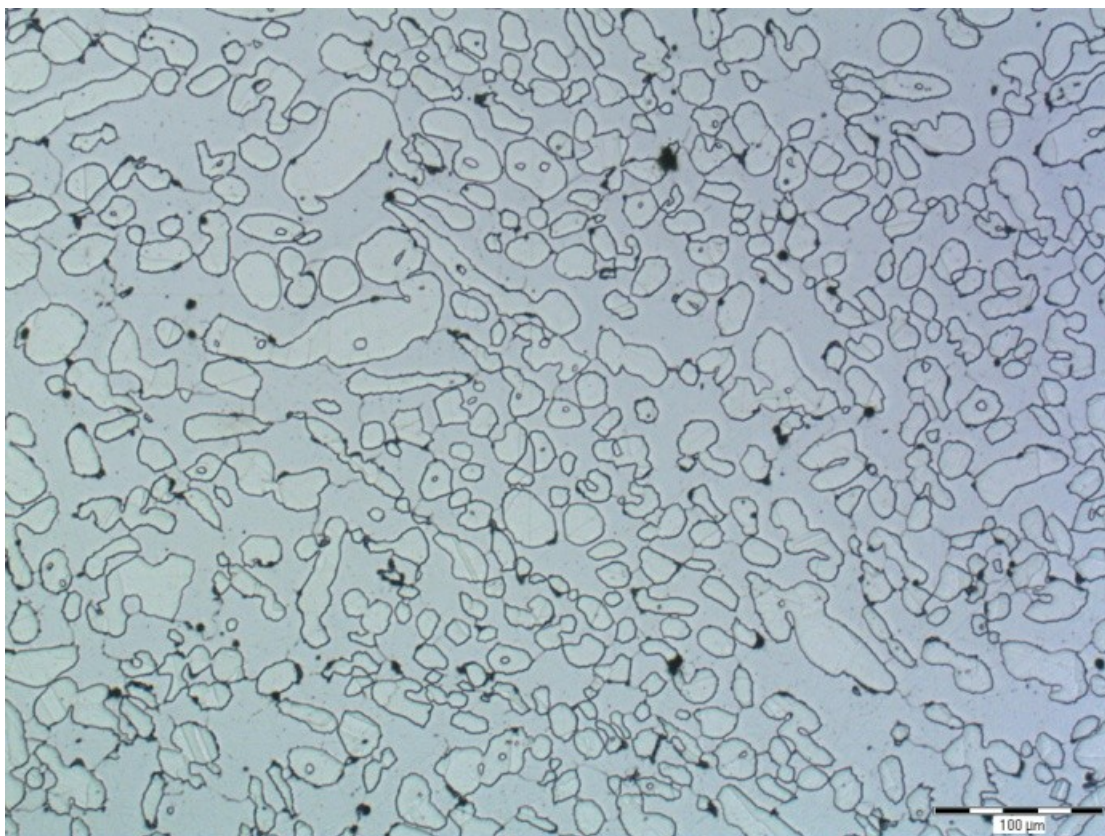
Obr. 20 b: Struktura „dodaného“ vzorku leptaného v roztoku NaOH.



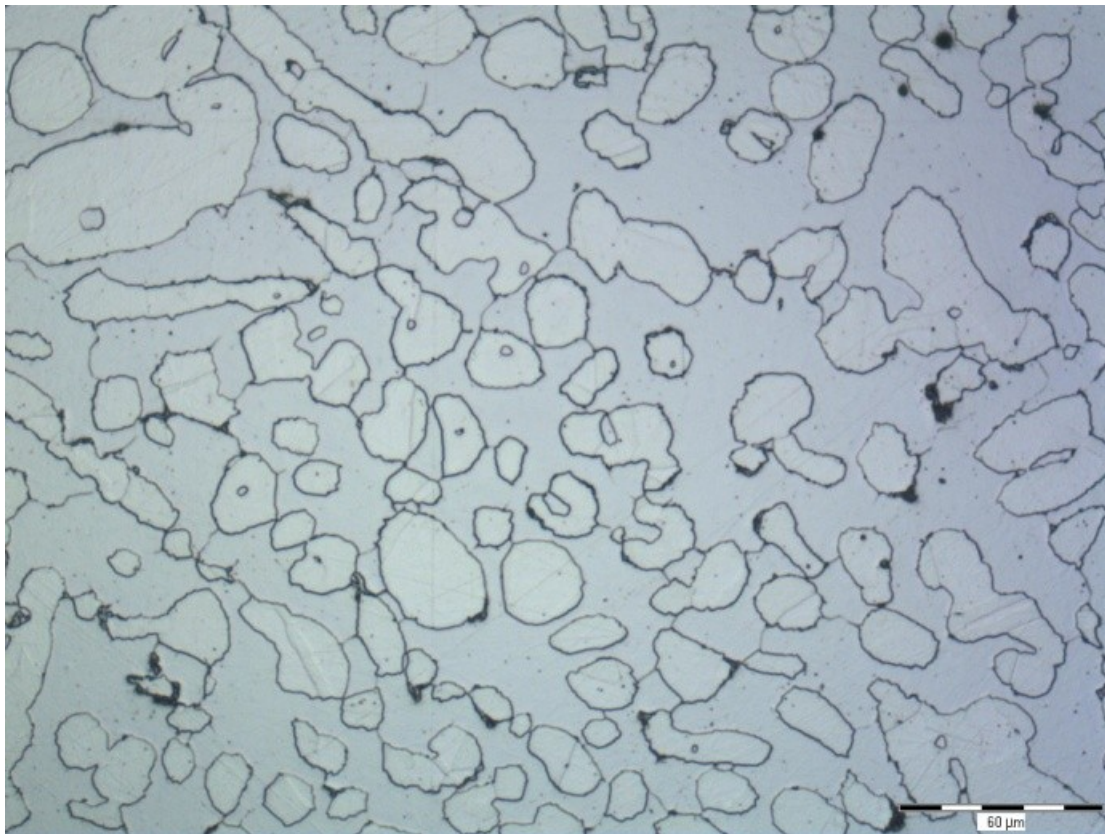
Obr. 21 a: Struktura vzorku „po žihání“ leptaného v roztoku NaOH.



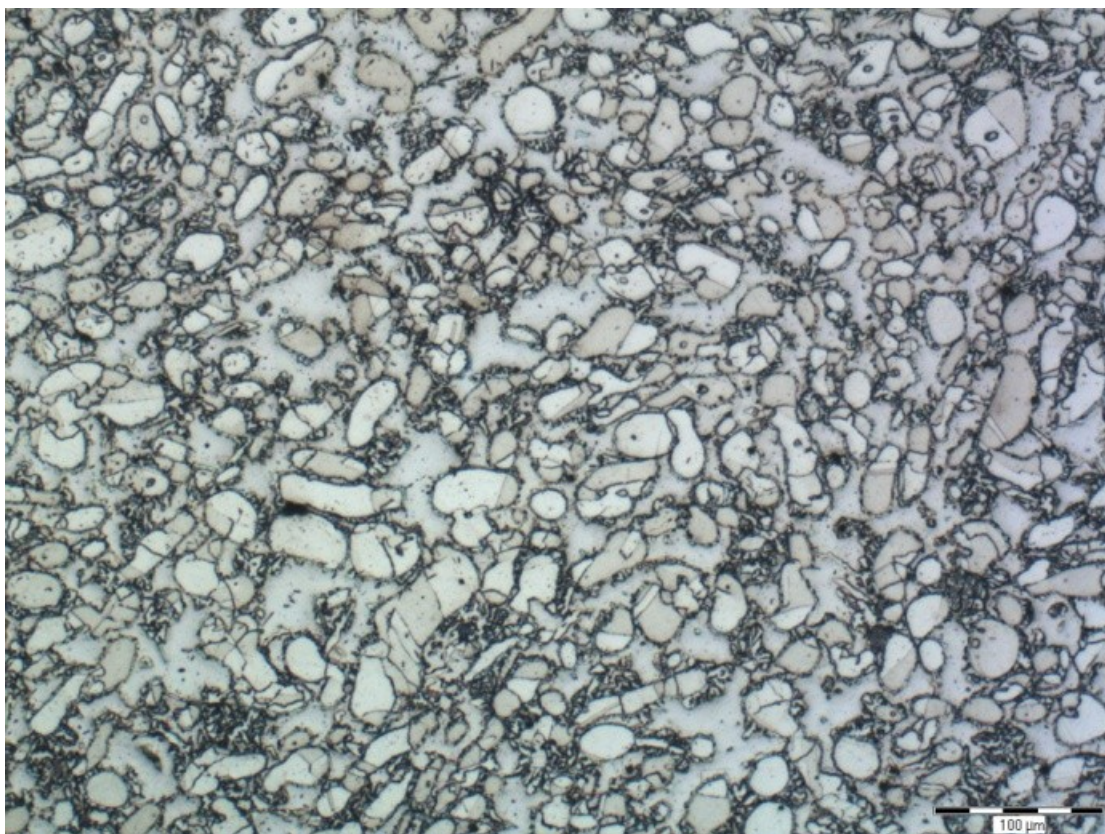
Obr. 21 b: Struktura vzorku „po žihání“ leptaného v roztoku NaOH.



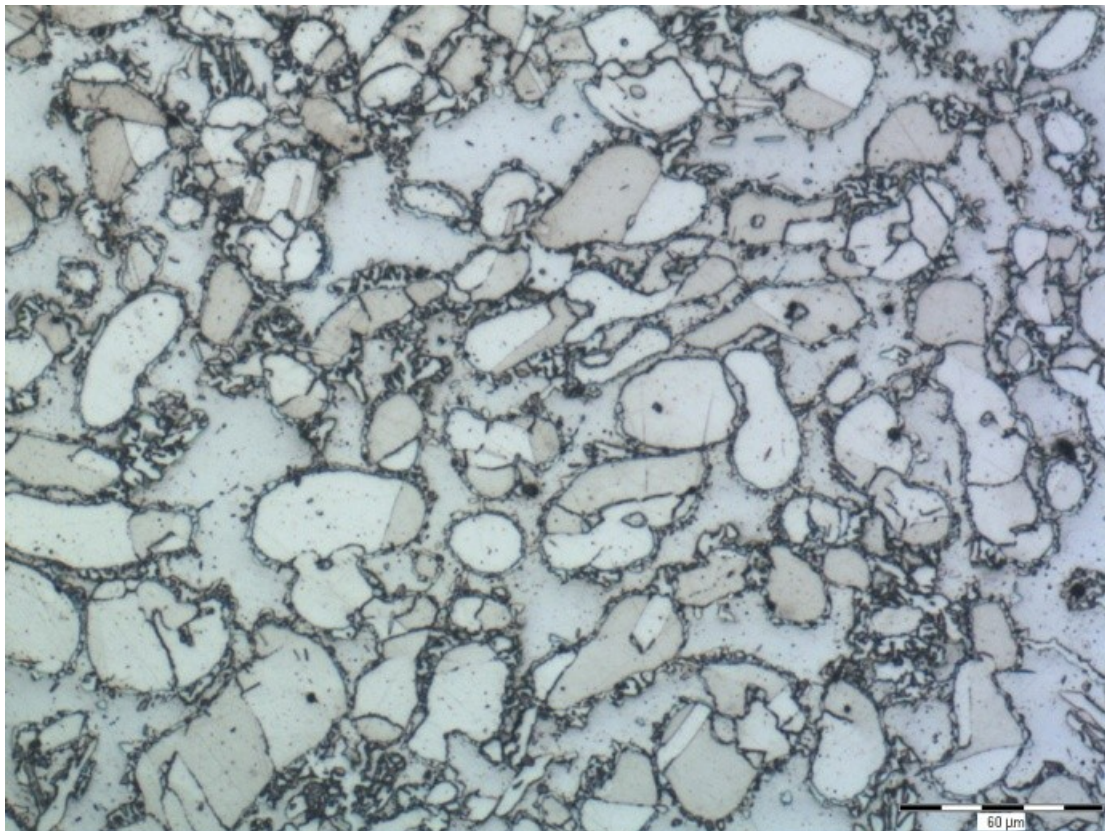
Obr. 22 a: Struktura „dodaného“ vzorku leptaného v roztoku V2.



Obr. 22 b: Struktura „dodaného“ vzorku leptaného v roztoku V2.



Obr. 23 a: Struktura vzorku „po žihání“ leptaného v roztoku V2.



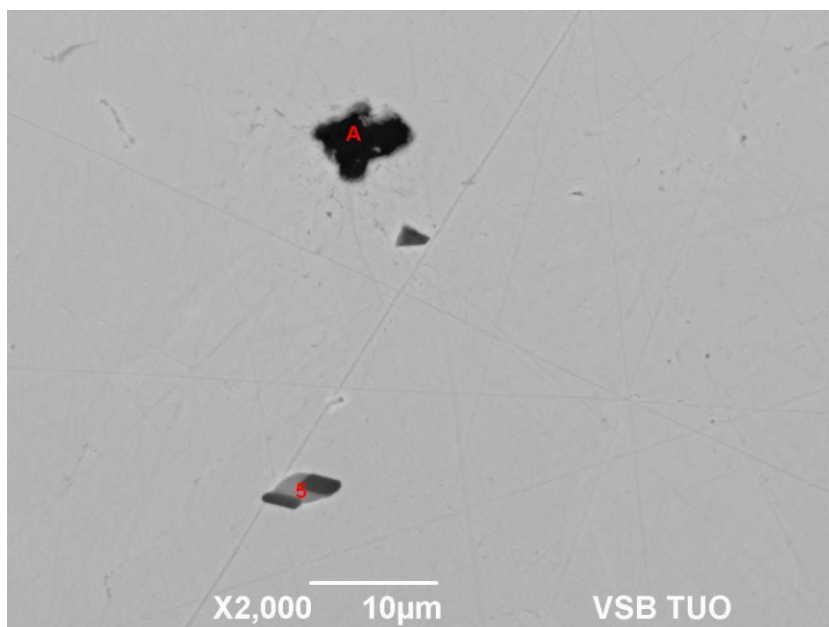
Obr. 23 b: Struktura vzorku „po žihání“ leptaného v roztoku V2.

5.3 Analýza vměstků

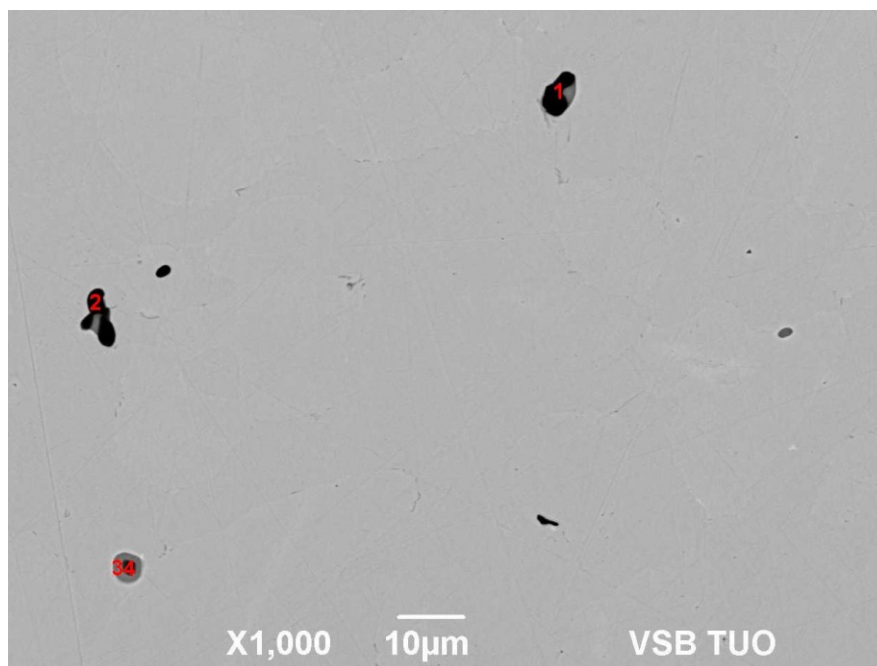
Při zkoumání vzorku duplexní oceli ve vyleštěném stavu bylo nalezeno několik druhu vměstků, které byly zkoumány na rastrovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSM-6490LV pomocí metody BEC (zpětně odražených elektronů), systémem EDS Inca x-act (energieově disperzní analýza) bylo zjištěno jejich chemické složení a programem Swift ED byly vytvořeny jejich snímky. Nalezené vměstky byly hlavně oxidy hliníku, sulfidy manganu a nitridy bóru (Obr. 24 a 25), ty byly rovnoměrně rozprostřeny ve struktuře. Zjištěné složení vměstků z vzorků jsou zaznamenány v Tab. 7.

Tab. 7: Chemické složení vměstku.

Prvky [hm %]											
Měření	B	N	O	Al	Si	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
Spectrum A	38,39	56,70					1,73		3,18		
Spectrum1			39,99	35,37		8,28	1,73	12,55	2,08		
Spectrum2			49,41	41,71		0,83	3,09	1,36	3,60		
Spectrum3			3,79	1,87		25,37	11,31	42,44	15,22		
Spectrum4			37,70	26,15		13,28	2,01	18,95	1,91		
Spectrum5			19,13	15,65		16,36	8,25	25,14	14,85	0,62	
Matrice					0,91		24,31	1,36	65,10	4,20	4,13



Obr. 24: Nalezené vměstky. A – nitrid bóru, 5 – sulfid manganu s okraji tvořenými oxidy hliníku.



Obr. 25: Nalezené vměstky. 1 a 2 – oxid hliníku s malými částmi sulfidu manganu, 3 a 4 – sulfid manganu s jádrem z oxidu hliníku.

5.4 Tahová zkouška

Zkoušení bylo provedeno na servo-hydraulickém zkušebním zařízení LFV 100kN, na zkušebních tělesech kruhového průřezu, které měly průměr měrné části 3 mm. V Tab. 8 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti duplexní oceli v dodaném stavu a ve stavu po laboratorním žihání. Výsledky byly získány aritmetickým průměrem ze dvou tahových zkoušek pro každý stav.

Pro srovnání jsou naměřené hodnoty porovnané s EN standardem Ze zmíněné tabulky je patrné, že zkoumaný vzorek v „dodaném“ stavu odpovídá EN standardům a precipitace sigma fáze způsobila výrazné zvýšení pevnosti a snížení tažnosti a kontrakce.

Tab. 8: Základní mechanické vlastnosti v podélném směru.

stav	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]	$R_{p0.2}/R_m$ [-]
Dodaný stav	473	685	41	76	0,69
Po žihání	432	764	24	15	0,57
EN standard	≥ 450	≥ 650	20-30	-	0,69

5.5 Tvrdost a mikrotvrdost

Pomocí uhlopříček vytlačených zkušebním jehlanem při zatížení 30 kg, byla vypočítána Vickersova tvrdost podle vztahu (2). Naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v Tab. 9. Jak lze sledovat, precipitací sigma fáze došlo k nárůstu tvrdosti u vzorku po laboratorním žihání.

$$HV30 = 0,1891 * \frac{F}{U^2} = 0,1891 * \frac{9,81*30}{U^2} \quad (2)$$

Tab. 9: Tvrđost vzorků.

Vzorek	Dodaný stav				Po žíhání			
Měření	u ₁	u ₂	U	HV	u ₁	u ₂	U	HV
1	0,453	0,461	0,457	266	0,421	0,429	0,425	308
2	0,462	0,454	0,458	265	0,425	0,431	0,428	304
3	0,464	0,462	0,463	260	0,424	0,43	0,427	305
4	0,458	0,458	0,458	265	0,429	0,429	0,429	302
Průměrná tvrđost				264				305

V Tab. 10 jsou uvedeny naměřené hodnoty mikrotvrđosti fází, které byly změřeny na mikrotvrđoměru LECO s vestavěným optickým mikroskopem a vyhodnoceny pomocí počítače. Byla použita Vickersova metoda měření tvrđosti pomocí diamantového jehlanu při zatížení 0,01 kg (10g).

Tab. 10: Mikrotvrđost fází.

Mikrotvrđost HV0,01				
Číslo měření	Dodaný stav		Po žíhání	
	Ferit	Austenit	Ferit	Austenit
1	344	385	383	419
2	353	419	354	419
3	335	457	364	419
4	335	354	405	445
5	373	407	373	445
Průměr fází	348	404	375	429

ZÁVĚR

Přestože jsou duplexní oceli poměrně nové materiály, tak jsou neustále zlepšovány a dosahují stále lepších výsledků. Díky jejich výborným mechanickým vlastnostem a vysoké odolnosti proti korozi hlavně v prostředích obsahujících chloridy nahrazují stále častěji nelegované materiály, ale i austenitické korozivzdorné oceli v různých aplikacích v chemickém, potravinářském a stavebním průmyslu.

V teoretické části práce je diskutován vliv legujících prvků na vlastnosti duplexních ocelí, problematika metalurgických procesů, tváření a tepelného zpracování.

Cílem praktické části bylo ověření chemického složení, mechanických vlastností a provedení strukturně fázové analýzy duplexní oceli X2CrNiMoN22-5-3. Ocel byla testována ve dvou různých stavech, a to ve stavu dodaném a ve stavu po laboratorním žíhání režimem 800 °C/ 5 h/ vzduch.

Kontrolním chemickým rozbořem bylo zjištěno, že studovaná ocel zcela odpovídá EN standardu.

Metalografická šetření ukázala, že struktura oceli v dodaném stavu je tvořena feritem a austenitem, jejichž objemové podíly byly 61,88 % feritu a 38,12 % austenitu. Ve stavu po laboratorním žíhání bylo zjištěno vytvoření intermetalické sigma fáze. Tato fáze precipitovala na hranicích zrn austenitu a feritu zhruba v množství 14 obj. %, obsah feritu se snížil na 46,09 % a obsah austenitu zůstal relativně nezměněn s 39,31 %. Při laboratorní tahové zkoušce bylo zjištěno, že vzorek v dodaném stavu odpovídal EN standardu, a u vzorku po laboratorním žíhání bylo došlo ke zvýšení meze pevnosti o 80 MPa, ale také snížení smluvní meze pevnosti o 40 MPa, snížení tažnosti o 17 % a kontrakce o 60 % díky precipitaci sigma fáze. Vickersovou metodou měření tvrdosti bylo zjištěno zvýšení tvrdosti laboratorně žíhaného vzorku o 40 HV oproti dodanému stavu.

Nalezené vměsky byly podrobeny chemické analýze a bylo zjištěno, že se nejčastěji jedná o oxidy hliníku, sulfidy manganu a nitridy bóru, tyto vměsky byly relativně rovnoměrně rozprostřeny v kovové matici.

Z výsledků laboratorních měření lze konstatovat, že studovaná duplexní ocel splňovala v dodaném stavu všechny požadavky, které jsou na tyto oceli kladené. Laboratorní žíhání mělo za následek precipitaci sigma fáze na rozhraní feritu a austenitu, což mělo podstatný vliv na dosaženou úroveň mechanických vlastností, přičemž se vlastnosti změnily většinou k horšímu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČÍHAL, V. Korozivzdorné oceli a slitiny. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
- [2] PÍŠEK, F.; RYŠ, P.; MAZANEC, K.; et al. Nauka o materiálu – Železo a jeho slitiny . 2. rozš. a zcela přeprac. vyd. Praha: Academia, 1975, 542 s.
- [3] ŠENBERGER, J. Metalurgie oceli na odlitky. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [4] HERNAS, A. Žáruprvné oceli a slitiny. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2009, 389 s. ISBN 978-80-248-2187-0.
- [5] Steelnumber: European steel and alloy grades catalogue. 2011. Dostupný z http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php.
- [6] Sandvik materials technologi: Developer and producer of stainless steels. Dostupný z <http://www.smt.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/>.
- [7] Metalcor: Distribution special metals. Dostupný z <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/4/>.
- [8] Imoa: Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steel. ISBN: 978-1907470-09-7. Str. 68. Dostupný z http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_3rd_Edition.pdf.
- [9] SHARGAY, C. Application of Duplex Stainless Steels in Refining: Overview of API 938C [on-line]. 2005, Dostupné z: <http://www.stainless-steel-world.net/duplex/index.aspx>.
- [10] ŠTĚTINA, J. Plynulé odlévání kovu. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/stetina/disertace/kapitola-1.htm>.
- [11] FS – TUL. Tváření kovu. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm.
- [12] MAZANCOVÁ, E. Technické materiály I – Kovové materiály (Učební text), Ostrava 2012, 150 s. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [13] Strojírenský měsíčník. Dostupné z: www.mmspektrum.com.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Název
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez pevnosti
KV	[J.cm ⁻²]	Použitá energie při zkoušce rázem v ohybu s V-vrubem
A	[%]	Tažnost
Z	[%]	Kontrakce
HB	[-]	Tvrдость podle Brinella
HV	[-]	Tvrдость podle Vickerse
F	[N]	Síla zatížení
U	[mm]	Průměrná úhlopříčka
PREN	[-]	(Pitting resistance equivalent number) - index odolnosti proti bodové korozi
EOP	[-]	Elektrická oblouková pec
EIP	[-]	Elektrická indukční pec
AP	[-]	(Argon Pouring) – Dmýchání argonu
LF	[-]	(Ladle Furnace) - Pánvová pec
AOD	[-]	(Argon Oxygen Decarburisation) – Argon- kyslíkové oduhličení
CLU	[-]	(Creusot Loire – Udelboholm) – název podle místa prvních použití
VD	[-]	(Vacuum Degassing) - Vakuové odplynění
VOD	[-]	(Vacuum Oxygen Decarburisation) – Vakuově-kyslíkové oduhličení
VAD	[-]	(Vacuum Arc degassing) – Vakuově- obloukové odplynění